

УДК 004.732

С. А. Нестеренко, д-р техн. наук,
Ю. С. Нестеренко

МОДЕЛЬ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА СВЯЗИ СТАНДАРТА 802.11

Аннотация. Проведена разработка математической модели пропускной способности беспроводного моноканала стандарта 802.11 в условиях воздействия помех. Проведен анализ погрешности разработанной модели. С использованием разработанной модели проведено исследование различных режимов работы беспроводного канала.

Ключевые слова: математическая модель, беспроводная сеть, стандарт 802.11, уровень битовых ошибок, верификация модели

S. A. Nesterenko, DSc.,
J. S. Nesterenko

BANDWIDTH MODEL OF 802.11 STANDARD WIRELESS CHANNEL

Abstract. The development of wireless monochannel standard 802.11 bandwidth mathematical model in the conditions of bit error rate action is carried out. The error analysis of the developed model is carried out. With the use of the developed model a study of different work regimes of wireless channel is carried out.

Keywords: mathematical model, standard 802.11 wireless network, the level of bit errors, verification of model

С. А. Нестеренко, д-р. техн. наук,
Ю. С. Нестеренко

МОДЕЛЬ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ БЕЗДРОТОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ 802.11

Анотація. Проведено розробку математичної моделі пропускної здатності бездротового моноканалу стандарту 802.11. Проведено аналіз похибки розробленої моделі. З використанням розробленої моделі проведено дослідження різних режимів роботи бездротового каналу.

Ключові слова: математична модель, бездротова мережа, стандарт 802.11, рівень бітових похибок, верифікація моделі.

Актуальность проблемы. Развитие современных компьютерных сетей выполняется, как правило, за счет добавления в их состав беспроводных сегментов, работающих по технологии IEEE 802.11 [1].

Анализ, проектирование и модернизация таких сегментов осуществляется с использованием моделей характеристик их функционирования [2 – 4]. При этом в качестве основной модели рассматривается модель пропускной способности беспроводного канала [5 – 7]. Анализ известных моделей пропускной способности показывает, что они получены в предположении о работе сети в условиях низкого уровня битовых ошибок [8 – 11]. Однако часто беспроводные сети работают в условиях высокого уровня битовых ошибок ($10^{-6} - 10^{-4}$) [12], что определяет необходимость разработки модели пропускной способности канала связи, учитывающей воздействие помех.

© Нестеренко С.А., Нестеренко Ю.С., 2014

В статье приведено описание математической модели пропускной способности беспроводного канала стандарта IEEE 802.11, которая учитывает влияние на производительность сети битовых ошибок в канале связи.

Математическая модель. Процедура передачи кадра по беспроводному каналу стандарта IEEE 802.11 в режиме без установления соединения может быть представлена в виде следующей последовательности временных интервалов и блоков информации: DIFS → Back of period → FM → SIFS → ACK, где DIFS, Back of period и SIFS – временные интервалы, определяемые стандартом, FM – информационный кадр, ACK – кадр подтверждения. При использовании режима с установлением соединения схема имеет следующий вид: DIFS → Back of period → RTS → SIFS → CTS → FM → SIFS → ACK, где RTS и CTS служебные кадры запроса и подтверждения установления соединения между отправителем и получателем.

лем информационного кадра FM. Не зависимо от режима работы канала в случае искажения кадра из-за действия битовых ошибок получатель не передает подтверждение АСК. Информационный кадр передается повторно и при этом длительность Back of period увеличивается в два раза.

Длительность сеанса передачи кадра на канальном уровне стандарта IEEE 802.11 в байтах F может быть выражена в следующем виде:

$$F = H + M + B + I,$$

где H – размер заголовка и концевика информационного кадра FM и суммарный размер управляющих кадров АСК, RTS, CTS; M – размер поля PDU информационного кадра; B – размер Back off period; I – размер межкадровых пауз.

Пусть вероятность битовой ошибки в моноканале равна P_{BM} . Размер передаваемого кадра

$$N = H + M,$$

где H – размер заголовка кадра, M – размер поля PDU информационного кадра.

Вероятность безошибочной передачи кадра в беспроводном канале размером $N = H + M$ запишется в виде $(1 - P_{BM})^N$. Тогда вероятность искажения кадра в канале P_{FM}

$$P_{FM} = 1 - (1 - P_{BM})^N.$$

С учетом известной аналитической зависимости для разложения бинома Ньютона данное выражение можно представить в виде многочлена

$$P_{FM} = NP_{BM} - N(N-1)(P_{BM})^2/2 + N(N-2)(P_{BM})^3/6 - \dots$$

В последнем выражении члены, начиная со второго, более чем на два порядка меньше первого. Следовательно, ими можно пренебречь, а выражение представить

$$P_{FM} = NP_{BM}.$$

Ошибка при передаче кадра приводит к тому, что он передается повторно. В повторной передаче также может произойти ошибка и она будет повторена с вероятностью $(P_{FM})^2$. Вероятность повторных передач P_{RT} , связанная с n -кратными

ошибками при передаче кадра, можно записать

$$P_{RT} = P_{FM} + (P_{FM})^2 + (P_{FM})^3 + (P_{FM})^4 + \dots$$

Эффективную скорость передачи на канальном уровне V_C с учетом вероятности повторных передач P_{RT} или пропускную способность беспроводного канала можно представить

$$V_C = \frac{M \cdot V_F}{F(1 + P_{RT})}.$$

Обозначим через $L = H + I$, тогда $F = L + M + B$. С учетом того, что при каждой повторной передаче величина периода ожидания B увеличивается в 2 раза, знаменатель дроби для вычисления V_C можно записать в следующем виде:

$$F(1 + P_{RT}) = (L + M) + (L + M)P_{FM} + (L + M)P_{FM}^2 + (L + M)P_{FM}^3 + (L + M)P_{FM}^4 + \dots + B + B2P_{FM} + B(2P_{FM})^2 + B(2P_{FM})^3 + B(2P_{FM})^4 + \dots$$

В данном выражении первые пять членов представляют собой геометрическую прогрессию с первым членом $L + M$ и знаменателем P_{FM} , который меньше 1. Сумма членов геометрической прогрессии S находится по формуле

$$S = \frac{b_1}{1 - q},$$

где b_1 – первый член, q – знаменатель прогрессии.

Аналогично члены с 6 по 10 представляют собой геометрическую прогрессию с первым членом B и знаменателем $2P_{FM}$. Следовательно, выражение для расчета пропускной способности на канальном уровне V_C можно представить

$$V_C = \frac{M \cdot V_F}{\frac{L + M}{1 - P_{FM}} + \frac{B}{1 - 2P_{FM}}}.$$

С учетом того, что $P_{FM} = (H + M)P_{BM}$ и $L = H + I$ данное выражение может быть представлено в таком виде:

$$V_C = \frac{M \cdot V_F}{\frac{H + I + M}{1 - (H + M)P_{BM}} + \frac{B}{1 - 2(H + M)P_{BM}}}$$

Это выражение является математической моделью расчета пропускной способности беспроводного канала связи стандарта IEEE 802.11.

Определим область допустимых значений информационного поля кадра M для соответствующих уровней P_{BM} . Очевидно, что размер M определяется из выражения $1 - 2(H + M)P_{BM} > 0$. Откуда максимально допустимое значение получаем $M_{MAX} = 0,5P_{BM} - H$. Результаты расчета значений M_{MAX} для различных значений вероятности битовых ошибок в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-4} приведены ниже

P_{BM}	M_{MAX} , байт
10^{-6}	61430
10^{-5}	6180
	3055

$2 \cdot 10^{-5}$

1492

$4 \cdot 10^{-5}$

971

$6 \cdot 10^{-5}$

711

$8 \cdot 10^{-5}$

10^{-4}

555

С учетом того, что максимальный размер информационного поля ограничен стандартом IEEE 802.11 и равен 2Кбайт, область допустимых значений (Region of the Allowed Values – RAV) можно представить следующими данными

P_{BM}	M_{MAX} , байт
10^{-6}	2312

10^{-5} 2312
2312

$2 \cdot 10^{-5}$

1492

$4 \cdot 10^{-5}$

971

$6 \cdot 10^{-5}$

711

$8 \cdot 10^{-5}$

10^{-4} 555

Верификация математической модели. Для верификации математической модели проведем натурные эксперименты по измерению скорости передачи в беспроводной сети стандарта IEEE 802.11g. Для измерения будем использовать генератор сетевой нагрузки JPERF, который работает в режиме агент-сервер. Будем использовать режим генерации пакетов различного размера по протоколу UDP/IP в режиме с максимальной интенсивностью. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

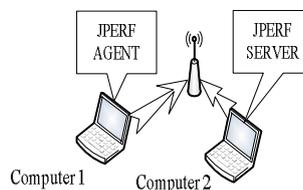


Рис. 1. Схема эксперимента по верификации математической модели

Будем учитывать то, что передача пакета по беспроводной сети состоит из двух передач по беспроводному каналу. Первая передача от агента к точке доступа и вторая передача от точки доступа к серверу. Следовательно, скорость передачи по беспроводному каналу составляет $V_C =$

$2 \cdot V_N$, где V_N – скорость передачи сети по

маршруту Computer 1 → Computer 2. Будем также учитывать, что передача по протоколу транспортного уровня ведется датаграммами размера D , которые упаковываются в информационное поле кадра M . Датаграмма стека UDP/IP имеет два поля заголовков H_{UDP} и H_{IP} . Следовательно, размер датаграммы D равен $D = M - H_{UDP} - H_{IP}$. Математическую модель скорости передачи датаграмм по маршруту Computer 1 → Computer 2 можно рассчитать по формуле:

$$V_C = \frac{(M - H_{UDP} - H_{IP}) \cdot V_F}{2 \left[\frac{H + I + M}{1 - (H + M)P_{BM}} + \frac{B}{1 - 2(H + M)P_{BM}} \right]}$$

Измерения будем проводить для различных значений информационного поля кадра M : 1500 байт, 1000 байт, 500 байт, 100 байт. Для каждого значения M проводим 10 серий по 15 измерений в каждой серии.

По результатам экспериментальных измерений и расчетов скорости передачи с использованием модели рассчитана относительная погрешность G математической модели во всем диапазоне изменения информационного поля кадра M .

Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Погрешность не превышает 4,5 % во всем диапазоне изменения размера кадра, что говорит о высокой точности разработанной математической модели. Следовательно, математическую модель можно использовать для исследования пропускной способности беспроводного канала стандарта 802.11 в различных режимах работы с учетом различных уровней битовых ошибок.

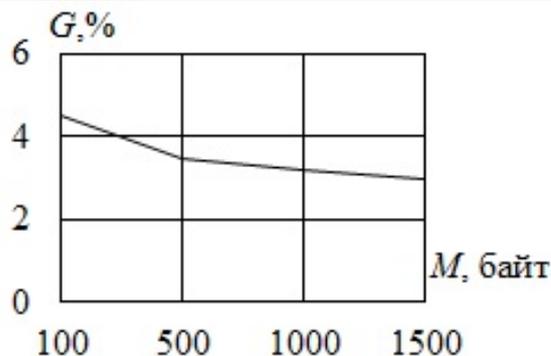


Рис. 2. Погрешность математической модели

Исследование пропускной способности беспроводного моноканала. С использованием разработанной модели было проведено исследование пропускной способности беспроводного канала стандарта IEEE 802.11g в режиме Base mode для различных уровней битовых ошибок (Bit error rate – BER) в моноканале. Результаты исследований приведены на рис. 3.

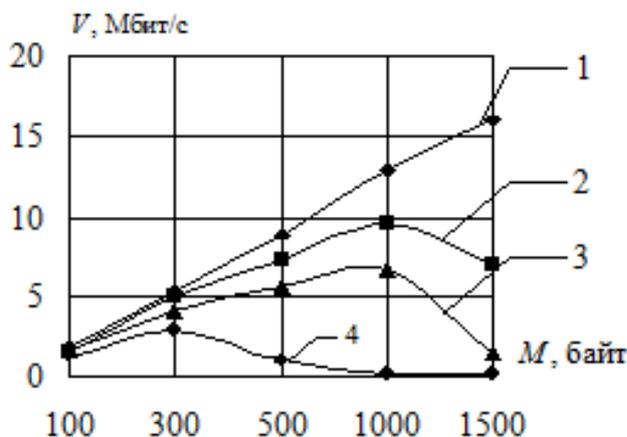


Рис.3. Пропускная способность беспроводного канал в режиме Base mode:

1 – BER=10⁻⁵, 2 – BER=3·10⁻⁵,

3 – BER=3·10⁻⁵, 4 – BER=10⁻⁴

Анализ результатов показывает, что при уровне битовых ошибок большем 10⁻⁵ для обеспечения максимально возможной пропу-

ской способности передачи в беспроводном канале в режиме Base mode необходимо вести кадрами меньшими, чем 1500 байт. При этом при уровне битовых ошибок, равным 10^{-4} , оптимальный размер кадра, обеспечивающий максимальную пропускную способность канала, составляет всего 300 байт.

С использованием модели было проведено исследование режимов Bursting и Fast Frames, которые ориентированы на повышение пропускной способности беспроводного канала за счет увеличения размера кадра до 4000 байт. Результаты исследований приведены на рис. 4.

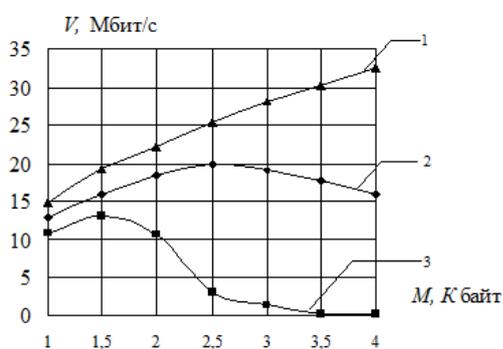


Рис. 4. Пропускная способность беспроводного канала в режимах Bursting и Fast Frames:

1 – $BER=10^{-6}$, 2 – $BER=10^{-5}$, 3 – $BER= 2 \cdot 10^{-5}$

Проведенные с использованием математической модели беспроводного канала исследования позволяют сделать вывод о том, что увеличение размера передаваемого кадра всегда приводит к увеличению эффективной пропускной способности канала в том случае, когда уровень битовых ошибок $BER \leq 10^{-6}$. В диапазоне BER от 10^{-6} до 10^{-5} необходимо выбирать размер кадра, который приводит к увеличению эффективной производительности беспроводного канала. При уровне $BER > 10^{-5}$ увеличение размера кадра больше 1500 байт приводит к уменьшению эффективной пропускной способности беспроводного канала связи. Таким образом, использование технологий

повышения производительности беспроводных сетей, таких как Fast Frames и Frame Concatenation при уровне $BER > 10^{-5}$, приводит не к повышению, а к понижению эффективной пропускной способности беспроводной сети.

Выводы. Предложенная атематическая модель позволяет рассчитывать пропускную способность беспроводного канала связи стандарта IEEE 802.11 во всех режимах его работы с учетом влияния на производительность уровня битовых ошибок BER , действующих в сети. Высокая точность модели позволяет использовать ее для исследования производительности беспроводной сети и выбора оптимального размера кадра, обеспечивающего максимальную пропускную способность беспроводного канала с учетом существующего в сети уровня BER .

Список использованной литературы

1. Пролетарский А. В. Беспроводные сети Wi-Fi [Текст] / А. В.Пролетарский, И. В. Беспалов, Д. Н. Чирков. – СПб. : БИНОМ, 2007. – 178 с.
2. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети [Текст] / В. Столингс. – М. : Вильямс, 2003. – 640 с.
3. Рошан П. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11 [Текст] / П. Рошан, Д. Лиэри. – СПб.: Вильямс, 2004. – 304 с.
4. Гейер Д. Беспроводные сети [Текст] / Д. Гейер. М.: Вильямс. – 2005. – 192 с.
5. Nesterenko S., Langman R., and Makarov O., (2012), The WOAS Project: Web-oriented Automation Systems, *Proceedings of International Conference REV-2012*, No.1, pp. 341 – 345.
6. Marsan M. Meo M., (2011), Energy Efficient Wireless Internet Access with Cooperative Cellular Networks, *Computer Networks*, Vol. 55, No. 2, pp. 386 – 398.
7. Gambiroza V., Sadeghi B., and Knightly E., (2004), End-to-end Performance and Fairness in Multihop Wireless Backhaul Networks, *Proceedings of ACM Mobicom*, pp. 289 – 301.
8. Gupta P., and Cumar P., (2000), The Capacity of Wireless Networks *IEEE*

Transactions on Information Theory, Vol. 46, pp. 388 – 404.

9. Lai K., and Baker M., (2007), Measuring link Bandwidth using a Deterministic Model of Packet Delay, *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 283 – 294.

10. Prasad R., Murray M., Dovrolis C., and Claffy K., (2003), Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques and Tools, *IEEE Network*, Vol. 17, No. 6, pp. 27 – 35.

11. Zhang J., Chen G., and Marsic I., (2003), Models for Non-intrusive Estimation of Wireless Link Bandwidth, *Proceedings of PWC*, pp. 234 – 240.

12. Chatrimisios P., Vitsas V., and Boucouvalas A., (2002), Throuput and delay Analysis of IEEE 802.11 Protocol, *Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Networked Appliances*, pp. 215 – 223.

Получено 03.03.2014

References

1. Proletarski A.V. *Besprovodnii seti Wi-Fi* [Wireless Networks Wi-Fi], (2007), *BINOM Publ.*, St.Petersburg, Russian Federation, 178 p. (In Russian).

2. Stolings V. *Besprovodnii linii svyazi i seti* [Wireless Links and Networks], (2003), *Viliams Publ.*, Moscow, Russian Federation, 640 p. (In Russian).

3. Roshan P. *Osnovi postroenia nesprovodnih seti standarta 802.11* [Basics of 802.11 Standard Wireless Networks Design], (2004), *Viliams Publ.*, St.Petersburg, Russian Federation, 304 p. (In Russian).

4. Geer D. *Besprovodnii seti* [Wireless networks] (2005) *Viliams Publ.*, Moscow, Russian Federation, 192 p. (In Russian).

5. Nesterenko S., Langman R., and Makarov O., (2012), *The WOAS project: Web-oriented Automation Systems*, *Proceedings of International conference REV-2012*, No.1, pp. 341 – 345 (in English).

6. Marsan M., and Meo M., (2011), *Energy Efficient Wireless Internet Access with Cooperative Cellular Network*, *Computer Networks*, Vol. 55, No. 2, pp. 386 – 398 (In English).

7. Gambiroza V. Sadeghi B., and Knightly E., (2004), End-to-end Performance and Fairness in Multihop Wireless Backhaul Networks, *Proceedings of ACM Mobicom*, pp. 289 – 301 (In English)

8. Gupta P., and Cumar P. (2000), The Ccapacity of Wireless Networks *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, pp. 388 – 404 (In English).

9. Lai K., Baker M., (2007), Measuring Link Bandwidth using a Deterministic Model of Packet Delay, *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 283 – 294 (In English).

10. Prasad R., Murray M., Dovrolis C., and Claffy K., (2003), Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques and Tools, *IEEE Network*, Vol. 17, No. 6, pp. 27 – 35 (In English).

11. Zhang J., Chen G., and Marsic I. (2003), Models for Non-intrusive Estimation of Wireless Link Bandwidth, *Proceedings of PWC*, pp. 234 – 240 (In English).

12. Chatrimisios P. Vitsas V., and Boucouvalas A., (2002), Throuput and Delay Analysis of IEEE 802.11 Protocol, *Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Networked Appliances*, pp. 215 – 223 (In English).



Нестеренко Сергей
Анатольевич,
д-р техн. наук, проф.
зав. каф. компьютерных
интеллектуальных систем и
сетей, проректор Одесского
нац. политехн. ун-та,
м/т: +3(067)-55-89-637,
E_mail: sa_nesterenko@ukr.net



Нестеренко Юлия
Сергеевна,
аспирант каф. компьютерных
интеллектуальных систем и
сетей Одесского нац.
политехн. ун-та,
м/т: +3(068)2619923,
E_mail: julie_nestro@mail.ru